

АНДРЕЙ ЖУРАВЛЕВ
СОТВОРЕНИЕ
ЗЕМЛИ

КАК ЖИВЫЕ
ОРГАНИЗМЫ
СОЗДАЛИ
НАШ МИР


ТРАЕКТОРИЯ


АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

Андрей Журавлев

**Сотворение Земли. Как живые
организмы создали наш мир**

«Альпина Диджитал»

2018

Журавлев А.

Сотворение Земли. Как живые организмы создали наш мир /
А. Журавлев — «Альпина Диджитал», 2018

ISBN 978-5-9614-5294-5

Если бы не живые существа, Земле была бы уготована унылая участь Марса. Именно разные организмы – от бактерий до цветковых растений и млекопитающих – превратили третью планету от Солнца в обитаемый мир, создали ее нынешнюю атмосферу, значительно повлияли на состав Мирового океана и каменной оболочки – литосферы. Никакие существенные запасы полезных ископаемых – от органических угля и нефти до, казалось бы, инертного золота – не могли бы образоваться без влияния живых существ. О том, как формировалась наша планета – такая, какой мы ее знаем, – книга Андрея Журавлева, палеонтолога, доктора биологических наук, профессора кафедры биологической эволюции биологического факультета МГУ.

ISBN 978-5-9614-5294-5

© Журавлев А., 2018
© Альпина Диджитал, 2018

Содержание

| | |
|-----------------------------------|----|
| Предисловие | 7 |
| Часть I | 8 |
| Глава 1 | 10 |
| Глава 2 | 17 |
| Глава 3 | 24 |
| Глава 4 | 26 |
| Глава 5 | 34 |
| Конец ознакомительного фрагмента. | 38 |

Андрей Журавлев
Сотворение Земли. Как живые
организмы создали наш мир

Андрей Журавлев

СОТВОРЕНИЕ ЗЕМЛИ

КАК ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ
СОЗДАЛИ НАШ МИР



ТРАЕКТОРИЯ



АЛЬПИНА НОН-ФИКШН

москва 2018

Научные редакторы А. Марков, д-р биол. наук, профессор; Е. Самарин, д-р геол. – мин. наук, профессор

Редактор П. Суворова

Руководитель проекта А. Шувалова

Корректоры М. Миловидова, С. Чупахина

Компьютерная верстка А. Фоминов

Дизайн обложки Ю. Буга

Иллюстрация на обложке Shutterstock

В книге использованы иллюстрации из архива автора

© Журавлев А., 2018

© ООО «Альпина нон-фикшн», 2018

Рекомендовано к опубликованию решением учебно-методологического совета биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Все права защищены. Данная электронная книга предназначена исключительно для частного использования в личных (некоммерческих) целях. Электронная книга, ее части, фрагменты и элементы, включая текст, изображения и иное, не подлежат копированию и любому другому использованию без разрешения правообладателя. В частности, запрещено такое использование, в результате которого электронная книга, ее часть, фрагмент или элемент станут доступными ограниченному или неопределенному кругу лиц, в том числе посредством сети интернет, независимо от того, будет предоставляться доступ за плату или безвозмездно.

Копирование, воспроизведение и иное использование электронной книги, ее частей, фрагментов и элементов, выходящее за пределы частного использования в личных (некоммерческих) целях, без согласия правообладателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

* * *

*Моему отцу Юрию Журавлеву,
первому редактору этой книги*

Издание подготовлено в партнерстве с Фондом некоммерческих инициатив «Траектория» (при финансовой поддержке Н.В. Каторжного).

Фонд поддержки научных, образовательных и культурных инициатив «Траектория» (www.traektoriafdn.ru) создан в 2015 году. Программы фонда направлены на стимулирование интереса к науке и научным исследованиям, реализацию образовательных программ, повышение интеллектуального уровня и творческого потенциала молодежи, повышение конкурентоспособности отечественных науки и образования, популяризацию науки и культуры, продвижение идей сохранения культурного наследия. Фонд организует образовательные и научно-популярные мероприятия по всей России, способствует созданию успешных практик взаимодействия внутри образовательного и научного сообщества.

В рамках издательского проекта Фонд «Траектория» поддерживает издание лучших образцов российской и зарубежной научно-популярной литературы.

Предисловие

Сегодня нам трудно представить мир, где нет глубоких озер и величественных рек, где не идут дожди и не валит снег, в недрах которого нет ни угля, ни железа, ни золота, в воздухе не хватает кислорода, а вместо шести континентов – один огромный суперконтинент или, наоборот, только острова. А ведь все это наша Земля, только такая, какой она была за 30, 350, 2500 млн лет до появления человека. Да и всего 12 000 лет назад она была совершенно другой – с обширными ледниковыми щитами, покрывавшими значительные пространства северных континентов, огромными, гораздо большими, чем сейчас, степными просторами.

Мир менялся всегда. И нынешнее его состояние тоже непостоянно. И виной тому не какие-то глобальные катаклизмы, вроде падения астероидов, землетрясений и вулканических взрывов, а деятельность существ – от мельчайших бактерий и одноклеточных водорослей до елей, слонов и, конечно, человека (это тоже один из видов организмов, занимающий на Земле определенную нишу).

Пока на планете не появились первые сообщества организмов, на ней не образовывались железорудные, золоторудные, урановые и многие другие месторождения, а атмосфера была лишена кислорода. Пока не сложились настоящие лесные массивы, не могло быть долговременных озер и полноводных рек с обширными долинами, красивыми излучинами – меандрами – и островами, и, конечно, не образовывался каменный уголь. Фитопланктон – обитающие в верхних слоях водной толщи одноклеточные водоросли – стал не только главным пороодообразователем морских и озерных осадочных толщ, но и в значительной степени повлиял на облачный покров и климат планеты. И поскольку состав фитопланктона постоянно менялся, вместе с ним постоянно менялись и все эти, казалось бы, вечные природные феномены. Даже динозавры и мамонты приложили определенные усилия, чтобы мир стал чуточку другим. Конечно, есть в этом непостоянстве и свои циклы, скажем глобальные потепления и похолодания, но и эти циклы не являются повторением уже пройденного. А нынешнее «глобальное потепление» с точки зрения геологии и палеонтологии и вовсе таковым не является, поскольку на событие, способное оставить заметный след в геологической летописи, пока претендовать не может. Но если на него не обращать внимания – не изучать, – это явление может принести кучу бед.

Узнать же о прошлом Земли позволяют современные методы геологии и палеонтологии. Любые ископаемые организмы – в руках профессионального палеонтолога – становятся собеседниками, способными поведать много интересного. Именно остатки организмов, включая ископаемые следы, изотопные и молекулярные свидетельства их жизнедеятельности, позволяют наиболее полно реконструировать историю Земли за последние 4 млрд лет. Об этом этапе и пойдет речь в книге.

Часть I

Как бактерии создали атмосферу и все прочее (4000–635 млн лет назад)

| ЭОН | ЭРА | ПЕРИОД | Начало (млн лет) |
|----------------|---------------------|-------------|---------------------|
| протерозойский | неопротерозойская | эдиакарский | 635 |
| | | криогеновый | 850 |
| | | тонский | 1000 |
| | мезопротерозойская | стенский | 1200 |
| | | эктазский | 1400 |
| | | калиммский | 1600 |
| | палеопротерозойская | статерский | 1800 |
| | | орозирский | 2050 |
| | | риасский | 2300 |
| | | сидерский | 2500 |
| архейский | неоархейская | | 2800 |
| | мезоархейская | | 3200 |
| | палеоархейская | | 3600 |
| | эоархейская | | 4000 |
| хадейский | | | 4600 |

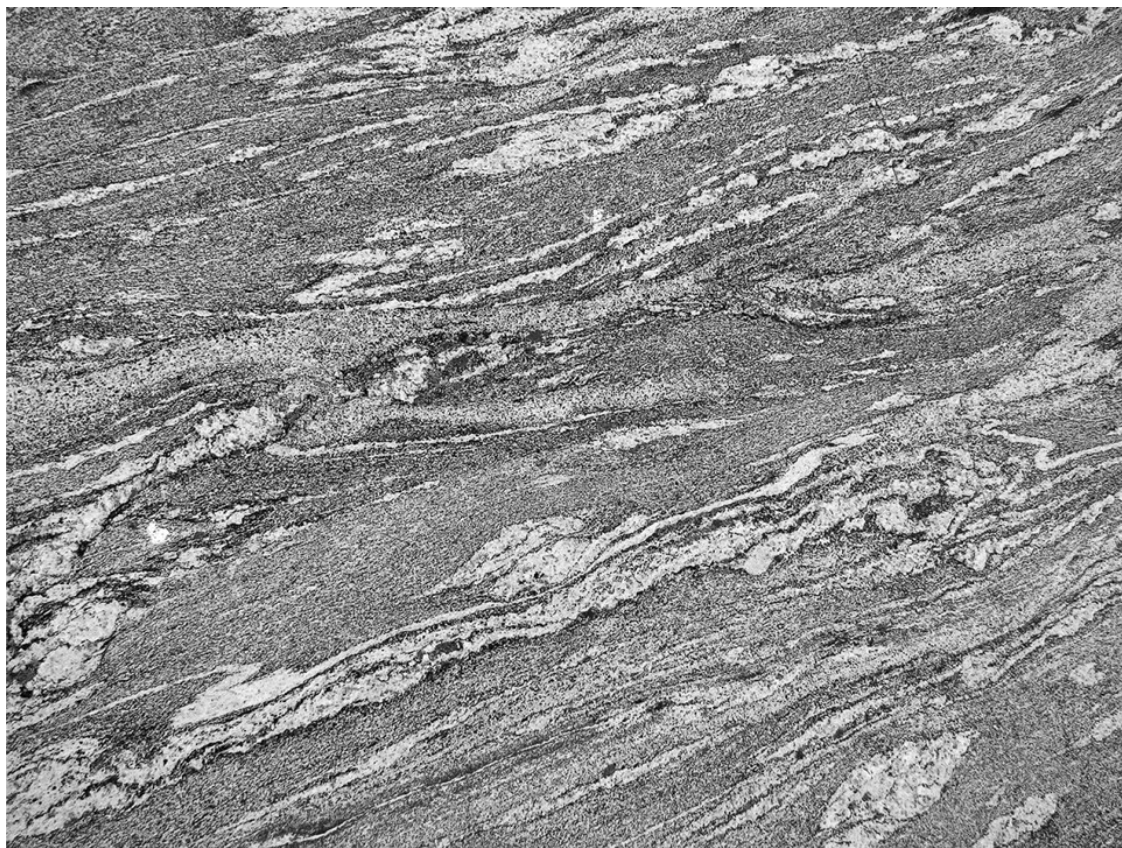


Рис. 11. Гранито-гнейсы Фенноскандинавского щита; архей (2,9–2,7 млрд лет); Карелия

Глава 1

Слои времени

В этой книге есть страницы с буквами, складывающимися в слова и предложения, чтобы передать мысли ученых, чьи труды послужили основой для раскрытия ее темы, есть нумерация страниц и есть названия глав, в которых отражено содержание. Очень похоже устроена и каменная летопись Земли: каждый слой осадочных горных пород – это страница; заключенные в нем минералы, элементы, стабильные и радиоактивные изотопы и остатки органических веществ – это буквы; а организмы и геохимические процессы, когда-то предопределившие, что слой по содержанию (минералов и прочего) окажется именно таким, – авторы первоисточников наших знаний.

В каменной летописи есть и отдельные главы с названиями, и нумерация страниц. Конечно, все это существует для удобства пользования книгой (этой или земной). Так, «главы» – это подразделения Международной хроностратиграфической шкалы, смысл которой передает слово «стратиграфия» – «слоев описание» (от *лат.* stratum – слой и *греч.* γράφω – чертить, писать). А нумерация страниц – радиометрические датировки горных пород. Правда, отсчет ведется обратный: например, первая глава – «архей» – занимает страницы с 4-миллиардной по 2,5-миллиардную, а подглавка «голоцен» – последние 11 700.

Не следует думать, что это некое умозрительное удобство: «архей» (4,0–2,5 млрд лет назад) резко отличается по смыслу и содержанию от «протерозоя» (2,5–0,541 млрд лет назад) и оба они – от «фанерозоя» (0,541 млрд лет назад – ныне). Радиометрические датировки применяются уже более сотни лет (первые из них с использованием радиоактивных изотопов гелия и радия были получены в 1904 г. английским физиком Эрнстом Резерфордом) и постоянно совершенствуются. Даже породы возрастом в сотни миллионов лет теперь можно датировать с точностью до нескольких тысячелетий (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Кристаллы циркона для определения радиометрического возраста; кембрий (530,7±0,9 млн лет); Восточный Ньюфаундленд, Канада (публикуется с разрешения Джозефа Киршвинка)

Наиболее распространенные методы радиометрического анализа – радиоуглеродный (в пределах 30 000 лет), аргон-аргоновый ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), рений-осмиевый (Re/Os), урано-свинцовые ($^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{232}\text{U}/^{208}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$); последние представляют собой совокупность четырех независимых измерений возраста для одного образца. Скепсис к подобному – «абсолютному» – выражению возраста Земли у профанов вызван тем, что они не догадываются о возможностях получения тех же возрастных характеристик сугубо геологическими методами.

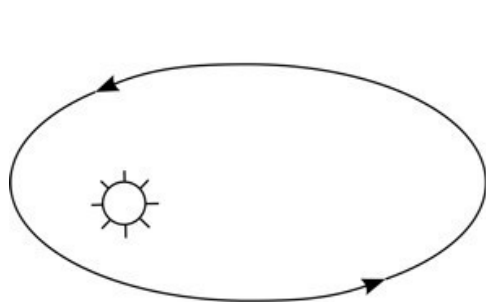
Достаточно, например, пересчитать количество осадочных слоев, не любых, конечно, а таких, которые формируются в течение года. Например, слои льда – это тоже горная порода (равно как и вода) в ледяных щитах Гренландии и Восточной Антарктиды. Последний позволяет нам заглянуть в прошлое на 160 000 лет (толщина ледяного панциря достигает здесь 2000 м). А благодаря пузырькам и «пыли» (тонким минеральным частицам), вмороженным в каждом слое, можно подробно узнать, каков был состав воздуха в те годы, какие преобладали температуры на поверхности планеты и откуда дули ветры.

Ленточные глины, а также их уплотненные аналоги – варвиты (от *швед.* varv – слой), образующиеся в озерах и в некоторых морях, позволяют «копнуть» еще глубже – на миллионы лет. Эти осадочные горные породы образуются благодаря ежегодному чередованию весенне-летнего и осенне-зимнего слоев от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров толщиной. (Далее вместо выражения «толщина» будет использоваться геологический эквивалент этой размерной характеристики – «мощность».) Весенне-летний слой осадка – обычно грубо-зернистый, светлый и содержит множество легко различимых скелетиков планктонных организмов (в этот сезон снос с суши усиливается, а жизнь во всех ее проявлениях процветает и расцветает), а осенне-зимний – тонкий и темный (сноса почти нет, лишь медленно оседает взвесь, а органика разрушается и уплотняется). Примерно также археологи подсчитывают годо-

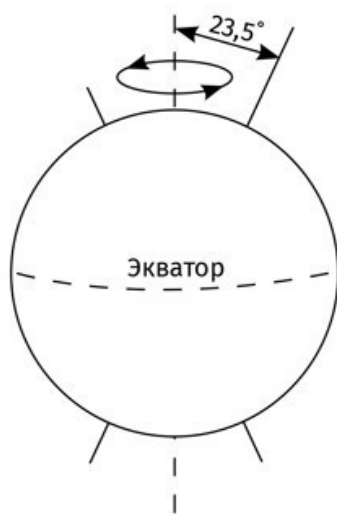
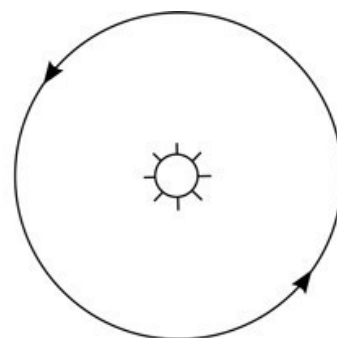
вые кольца у деревьев, чтобы получить дендрохронологические датировки. Правда, возраст отдельного дерева редко превышает первые тысячелетия, а варвиты образуют толщи в сотни метров, где число слоев доходит до нескольких миллионов. Чтобы получить хронологию Новгорода Великого, нужно создать дендрохронологическую шкалу всех наслоений его деревянных мостовых, а затем привязать к этой шкале прочие археологические находки (монеты, печати, берестяные грамоты). Чтобы выстроить хронологию Земли, можно точно так же переходить от одной толщи варвитов (геологического разреза) к другой, более древней...

Расчет возраста отложений по ленточным глинам (варвохронология) тоже имеет столетнюю историю: впервые возможности метода были показаны шведским геологом Герхардом Якобом де Геером на 11-й сессии Международного геологического конгресса, состоявшейся в Стокгольме в 1910 г. Просто радиометрическое датирование оказалось удобнее и дешевле (в том числе и радиоуглеродный метод в археологии вместо утомительного дендрохронологического). Точно так же, чтобы узнать, сколько страниц в этой книге, можно взглянуть на цифру, указанную на последней из них, а особо недоверчивые могут пересчитать все страницы. А если бы их было 4 млрд?

Когда же требуется узнать время, за которое сформировалась та или иная толща осадков, прибегают к варвохронологии или циклостратиграфии. Последний метод основан на выявлении повторяющихся ритмов в осадочных отложениях, связанных с периодичностью климатических колебаний. Связь такой периодичности с орбитальными циклами в Солнечной системе, где взаимное притяжение планет и крупных спутников искажает правильность орбит, предначертанную законами Кеплера – Ньютона, установил югославский физик Милутин Миланкович. Эти орбитальные циклы включают прецессию (примерно каждые 26 000 лет земная ось описывает коническую фигуру), нутацию (каждые 41 000 лет колеблется угол наклона оси к плоскости земной орбиты) и эксцентриситет – изменение формы орбиты с эллиптической на круговую и обратно, но в плоскости, перпендикулярной прежней, и снова на круговую каждые 400 000 лет (полный цикл) (рис. 1.3а – г).

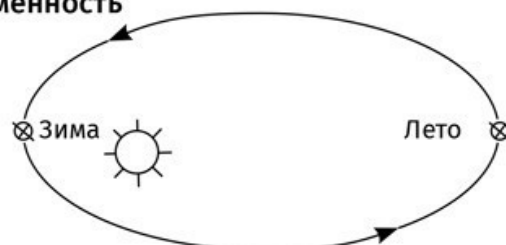


А

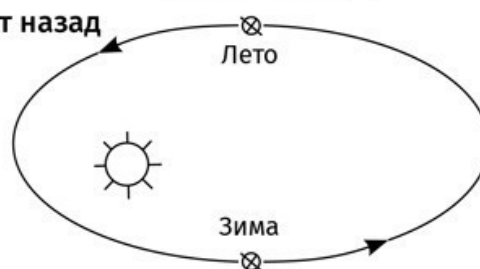


Б

Современность



5250 лет назад



10 500 лет назад

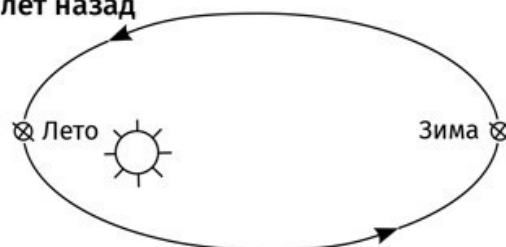
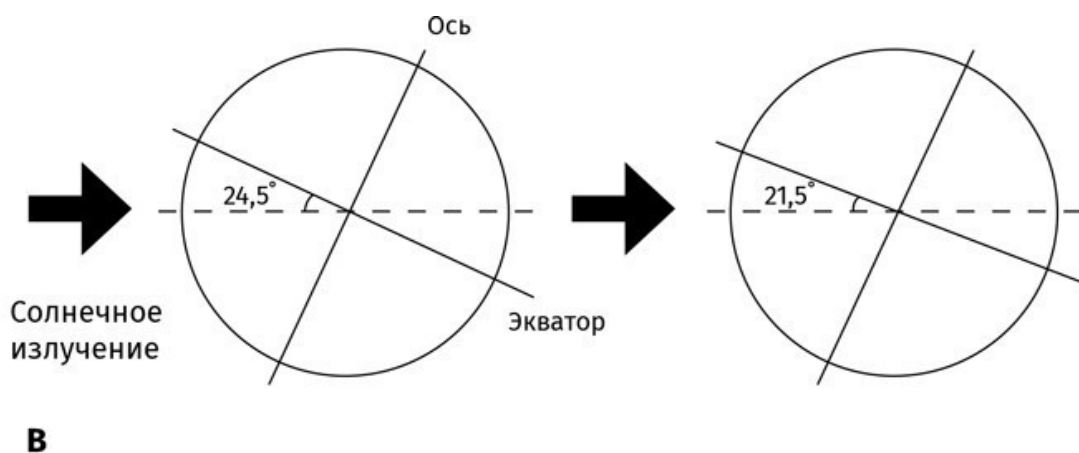


Рис. 1.3. Параметры орбиты Земли, влияющие на климатическую цикличность (циклы Миланковича): а) эксцентриситет (изменение формы орбиты с эллиптической на круговую, каждые 100 000 лет); б) прецессия (движение оси вращения Земли по круговому конусу, ось которого перпендикулярна земной орбите,



с периодом около 26 000 лет); в) нутация (колебание угла наклона оси по отношению к плоскости земной орбиты от $21,5^\circ$ до $24,5^\circ$, каждые 41 000 лет); г) ритмичность морских карбонатных отложений, обусловленная циклами Миланковича; кембрий (505 млн лет); р. Мая, Якутия

Эти смены орбитальных конфигураций приводят к тому, что через строго определенное количество лет планета оказывается то ближе к Солнцу тем или иным полушарием (прецессия и нутация) или вся целиком (эксцентриситет), то дальше от светила. В первом случае она получает несколько больше тепла, во втором – охлаждается. При наступлении теплой эпохи с обильными осадками в карбонатных породах накапливается больше частиц тяжелых минералов. Очевидно, сосчитать бесконечное число почти невидимых, пылевой размерности кусочков минералов во всех осадочных слоях нереально. Но можно определить величину магнитной восприимчивости каждого из них, которая зависит от содержания окислов железа, обладающих магнитными свойствами, построить магнитную спектрограмму и выявить число орбитальных циклов, в течение которых и накопились данные отложения.

Есть и другие сугубо геологические методы расчета возраста отложений горных пород и отдельных геологических объектов. Например, вулканические конусы базальтовых вулканов благодаря периодическим напластованиям застывших потоков лавы растут со скоростью около метра за столетие (рис. 1.4).

Зная, что высочайшая гора на Земле Мауна-Кеа (остров Гавайи) возвышается над ее поверхностью на 10 200 м (из них на 4205 м – над уровнем океана в виде острова), можно определить, что этому вулкану стукнуло более миллиона лет. Тот же возраст получаем, датируя самые древние базальты этой горы радиометрическими методами. Базальтовая лава вообще очень богатый материал. Поскольку новообразование базальтовых слоев в срединно-океанических хребтах связано с расширением океанов, по этим горным породам можно определить и возраст самых крупных планетарных водоемов. Так, Атлантическому океану исполнилось примерно 150 млн лет. Проверить датировку можно, используя данные высокоточных приемных устройств, расположенных на разных континентах и многократно измеряющих по атомным часам время прохождения спутниковых радиосигналов или лазерных лучей, отраженных от Луны и космических аппаратов (или просто данные GPS – глобальной системы определения координат). Согласно таким замерам скорость расширения Атлантики, скажем, между Северной Африкой и югом Северной Америки – 0,025 м в год. Разделим ширину океана между этими точками – 3 700 000 м – на данную величину и убедимся, что Атлантический океан родился 148 млн лет назад. (Возможно, именно в эту пятницу.) На небольших участках Атлантического океана возраст коры достигает 195 млн лет – она древнее, чем тихоокеанские плиты.

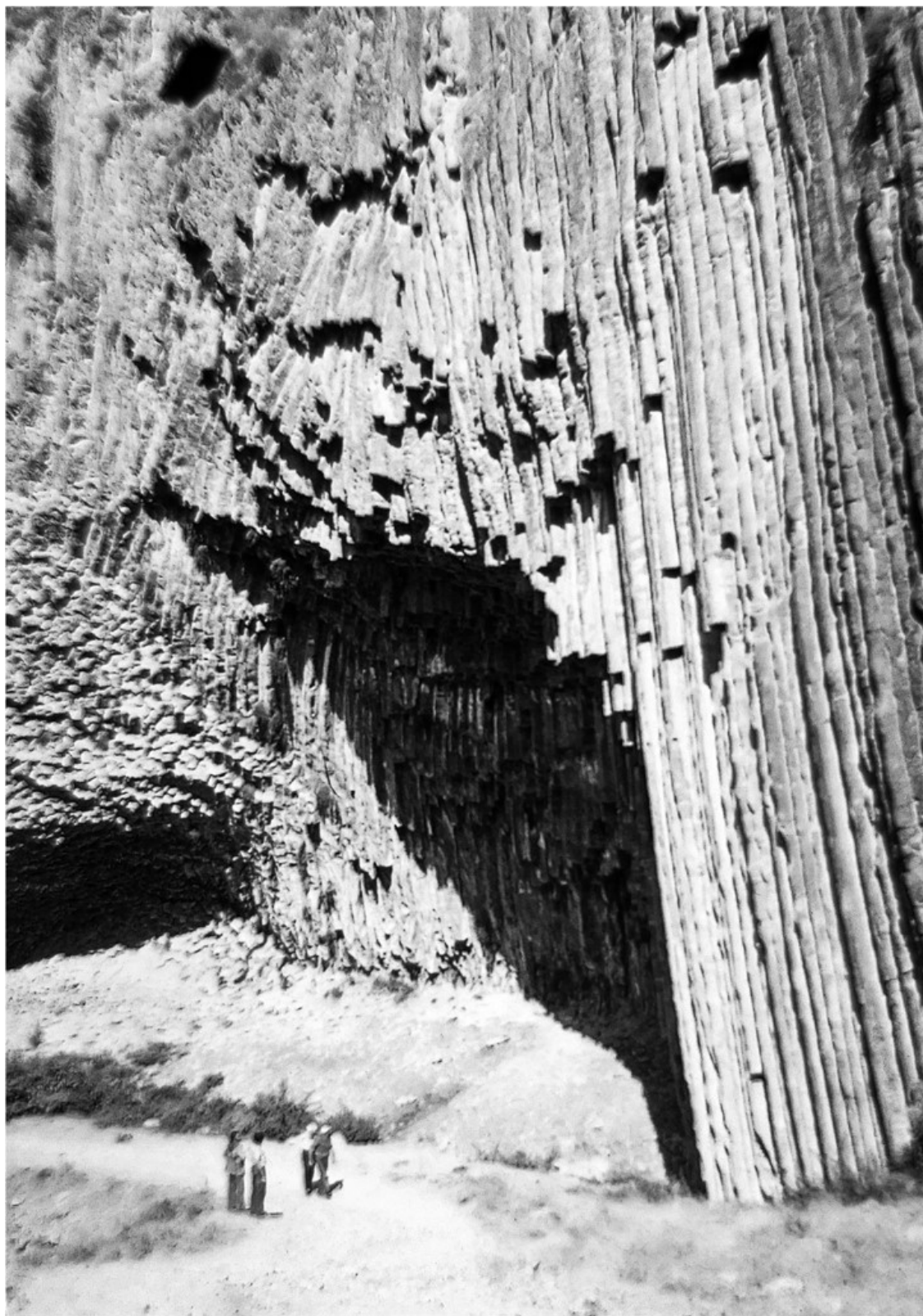


Рис. 1.4. Столбчатая отдельность платобазальтов (высота столбов до 18м, диаметр до 0,6м); плейстоцен (170 000–165 000 лет); ущелье Гарни, Армения

Глава 2

Как подвинуть Африку?

Океанические и тем более морские чаши постоянно меняют свои очертания. Когда не было современных океанов, существовали иные, ныне «вымершие»: Уральский на месте Уральских гор – более 320 млн лет назад, Япет на месте Аппалачей – свыше 450 млн лет назад. В этих горах навечно впаяны останцы прежних срединно-океанических хребтов – древние базальты, превратившиеся со временем в зеленокаменные комплексы – офиолиты. Типичная для такого комплекса горная порода офиолит (от *греч.* ὄφις – змея и λίθος – камень) известна среди уральских умельцев-камнерезов как змеевик из-за травянисто-зеленого цвета и чешуйчатой структуры.

Причиной грандиозных изменений лика Земли является тектоника литосферных плит. Тектоника (от *греч.* τέκτων – строитель, художник или τεκτονικός – искусный в строительном деле) – это, собственно, и есть строительство литосферы (от *греч.* λίθος – камень и σφαῖρα – оболочка) из отдельных блоков – плит. Последние состоят из твердой земной коры (совокупности осадочных, магматических и метаморфических горных пород) и подстилающих ее верхних слоев мантии, имеющих сходный химический состав. Скользят плиты, поднимаются и опускаются по вязкому и разуплотненному прослою верхней мантии – астеносфере (от *греч.* α – не, σφῆν – клин и σφαῖρα – оболочка). Континентальная кора легче океанической (менее плотная), поэтому материки, образующие ядра континентальных литосферных плит, возвышаются над ложем океана и в областях столкновения этих плит с океаническими остаются «на плаву». Наоборот, более тяжелые океанические плиты подныривают под них, уходя в глубоководные желоба, подобные Курило-Камчатскому и Марианскому, и еще на 600–700 км дальше, пока полностью не расплавятся. Этот процесс называется субдукцией (от *лат.* sub – под и ductio – увод, отведение). Столкновение циклопических структур происходит с выделением огромного количества энергии, что выражается в формировании гигантских вулканических очагов, таких как Тихоокеанское вулканическое кольцо, включающее Анды, Кордильеры, Камчатку, Курильскую островную дугу, Японию и Новую Зеландию. Движение тихоокеанских плит в сторону континентальных на периферии океана обусловлено постоянным ростом подводного хребта, известного как Восточно-Тихоокеанское поднятие, за счет образования все новых слоев океанической коры в продольных глубоководных расселинах хребта – рифтах (от *англ.* rift – трещина, щель) в зоне подъема к поверхности горячих мантийных конвективных потоков. (Тысячекилометровый разлом Сан-Андреас в Калифорнии, прославленный многими блокбастерами и землетрясениями, тоже относится к тихоокеанскому рифту, хотя вклинивается в сушу.) Кора образуется из базальтовой лавы, которая, застывая вдоль рифтовой расселины, способствует раздвижению океанических плит. Это явление называется «спрединг» (от *англ.* spread – расширять). Атлантический океан, продолжением которого является Северный Ледовитый, ведет себя вроде бы более спокойно: никаких вулканических арок на периферии нет. Но спрединг происходит и там – вдоль хребтов Срединно-Атлантического и Рейкьянес. Только движутся здесь океанические плиты вместе с ближайшими континентами. Поскольку сам океан имеет S-образную конфигурацию, южная часть его хребта, раздвигаясь, толкает на север Африку, а северная – ей навстречу Европу. Там, где материки упираются друг в друга, происходит коллизия (от *англ.* collision – столкновение) континентальных плит, и, словно при ударе друг о друга гигантских льдин, начинается «торошение» – растут горные хребты, подобные Альпийскому поясу от Пиренеев до Кавказа с вулканами и сопутствующими периодическими землетрясениями. Так как вдоль срединно-океанических хребтов, а также вдоль любых рифтов литосферные плиты расходятся, а на границе континентов или разных плит сходятся, первый тип границ называется дивергентным, а второй – конвергентным.

Теория литосферных плит, верность которой доказывается не только наблюдением за вышеперечисленными геологическими явлениями, но и за мерами движений плит благодаря спутниковому и наземному мониторингу, объясняет, почему на дне океанов бессмысленно искать самые древние отложения. Их и не нашли, несмотря на тысячи скважин, заложенных по проекту глубоководного бурения с корабля «Гломар Челленджер» и международной программе бурения океанического дна начиная с 1968 г. А вот на континентах, хотя и они претерпели существенные изменения, кое-что осталось. По большей части это кое-что – тоже морские отложения, поскольку материковый шельф является частью континентов, а порой целые материки «тонули», покрываясь на десятки миллионов лет обширными мелководными эпиконтинентальными морями, аналогов которых нет в современном мире. И это явление было обусловлено тектоникой литосферных плит, поскольку с ростом океанических хребтов огромные объемы воды выталкиваются из океанических чаш на сушу. Данный процесс называется тектоноэвстазией (от «тектоника» и *греч.* εὖ – совершенно, στάσις – стояние). Обусловленный тектоноэвстазией подъем уровня моря – на сотни метров – на порядок превышает рост уровня моря в результате таяния ледниковых шапок (гляциоэвстазия от *лат.* glacies – лед и эвстазия) – не более нескольких десятков метров. К слову, поскольку гигантские ледяные щиты Северной Америки и Европы растаяли около 12 000 лет назад, дальнейшее потепление к заметному повышению уровня моря уже не приведет. Впрочем, для исчезновения под волнами океана Нидерландов, Дании и Северной Сибири, наиболее богатой нефтегазовыми месторождениями части России, и этого будет достаточно.

Нас, однако, сейчас интересует не то, что исчезнет, а то, что осталось. Даже простые расчеты показывают: чем древнее земные породы, тем меньшие площади они должны занимать. Ведь любые горные хребты, будь то все еще величественный, но далеко не высотный Урал или Казахский мелкосопочник, когда-то вздымались Андами и Гималаями. Если мы, к примеру, возьмем горный хребт высотой 5 км и площадью 25 км² (условный квадрат 5 × 5 км), то общий объем горных пород в нем составит 125 км³. Любой, бывавший в горах, легко представит, что хребт прорезают ручьи и реки, что мороз и жара, а также деятельность самых разных организмов – от невидимых глазу бактерий и одноклеточных грибов до лишайников и кустарников – со временем превращают самые прочные скалы в труху курумов и речных наносов. И все это измельчается и перемещается все дальше и дальше от хребта. Такое преобразование горных пород на поверхности планеты за счет физико-химических и биохимических процессов называется выветриванием. Если с нашего условного хребта стекают пять горных рек, способных унести десятую часть кубометра горных пород в день каждая (далеко не самые бурные потоки), то за год они размоют около 180 м³. Значит, чтобы сровнять весь горный хребт с землей, живым и неживым силам природы понадобится не более 700 млн лет. (Кстати, именно так пытался определить возраст Земли английский геолог и биолог Чарлз Дарвин, избрав для расчетов мощность меловых утесов на юго-востоке Англии.) Так что чем древнее отложения, тем меньше от них остается в результате выветривания.

Еще более действенные процессы, связанные с тектоникой плит, – субдукция и гранитный метаморфизм в зоне коллизии. Ведь и сами материки вместе с шельфами не всегда были такими, как сейчас. Осталось ли вообще что-нибудь от древнейших отложений? Да, осталось. Хотя при возрасте Земли 4,567 млрд лет от ее горных пород возрастом свыше 4,03 млрд лет не сохранилось ничего, кроме жалких крох: переотложенных в более молодых осадках обломков кристаллов циркона (ZrSiO₄) – одного из самых устойчивых минералов – возрастом 4,2 и 4,4 млрд лет на кратоне Йилгарн (Западная Австралия). И даже эти крохи способны кое-что прояснить благодаря захваченным ими в момент кристаллизации частицам других минералов: например, наличие у планеты той поры земной коры, жидкой водной оболочки, где кристаллы сформировались, и магнитосферы. Данные о древнейшей водной оболочке особенно ценны,

поскольку от нее не уцелело больше ничего: она полностью испарилась и развеялась в космосе во время мощных метеоритных бомбардировок, которым планеты земной группы подверглись 4,0–3,8 млрд лет назад. К этому интервалу приурочено большинство лунных и марсианских кратеров; земные же поглощены тектоническими процессами. (Появились сведения об обнаружении в зеленокаменном поясе Нуввуагиттук на Канадском щите – на северо-западе полуострова Лабрадор – связанных с гидротермами морских отложений возрастом 3,77–4,28 млрд лет и даже о следах бактериальной жизнедеятельности в них. Однако эти находки и их датировка требуют дальнейшего всестороннего изучения.) В результате всевозможных и непрекращающихся преобразований земных слоев 80 % из них имеет возраст менее 200 млн лет, а вот на Луне, где процесс тектоники плит не пошел, те же 80 % представлены горными породами древнее 4 млрд лет. Поэтому, чтобы заглянуть глубже, придется слетать на Луну и привезти образцы оттуда, благо это уже сделали в 1960–1970-е гг. бесстрашные американские астронавты и хитроумные советские спускаемые аппараты: возраст древнейших лунных пород оказался 4,417 млрд лет (отдельных кристаллов – до 4,51 млрд лет). Некоторые включения минералов в метеоритах, найденных на Земле, но представляющих собой остатки протопланетного вещества, могут быть и постарше нашей планеты – до 4,568 млрд лет (время образования Солнечной системы) (рис. 2.1). Утерянная глава каменной летописи Земли – 4,568–4,0 млрд лет – называется хадейским эоном (от *греч.* *χάϊος* – подземный мир).



Рис. 2.1. Железоникелевый метеорит Гибсон (общая масса собранных обломков метеорита – 21000 кг); хадей (4,544 млрд лет); Намибия

Дальше речь пойдет исключительно о геологической истории Земли – о том огромном временном интервале (4 млрд лет), события которого можно восстановить с помощью седиментологических, геохимических, палеонтологических и других методов, применяемых в науках о Земле.

Уцелевшая, «первоначальная», летопись начинается с архейской эры (от *греч.* *ἀρχαῖος* – первоначальный, древний). Архейские «материки», по площади больше напоминавшие крупные современные острова, ныне вкраплены в различные континенты, где выходят на поверхность в виде древних щитов. А щиты состоят в основном из метаморфических (измененных, местами довольно сильно) горных пород, подобных гнейсам и гранитам (рис. 1.1). Геологи, геохимики и палеонтологи, правда, и среди этих клочков умудряются высмотреть наименее покореженные временем и тектоническими процессами останцы. К ним и приковано внимание ученого мира, особенно к древнейшим комплексам Акаста на северо-западе Канады (4,03 млрд лет), Исуа и Акилия на западе Гренландии (>3,8 млрд лет) и более молодым областям Канадско-Гренландского, или Канадского, щита, кратонам Йилгарн и Пилбара (3,6 млрд лет) в северо-западной части Австралийского щита, зеленокаменному поясу Барбертон (3,5 млрд лет) и кратонам Зимбабве и Каапвааль (3,6 млрд лет) на Южно-Африканском щите, и Фенноскандинавскому щиту, охватывающему Скандинавию, Финляндию, Карелию и Кольский полуостров (3,5 млрд лет) (рис. 2.2). Кратоны (от *греч.* *κράτῑνω* – укреплять) – это самые древние стабильные участки коры, которые условно можно считать протоконтинентами.

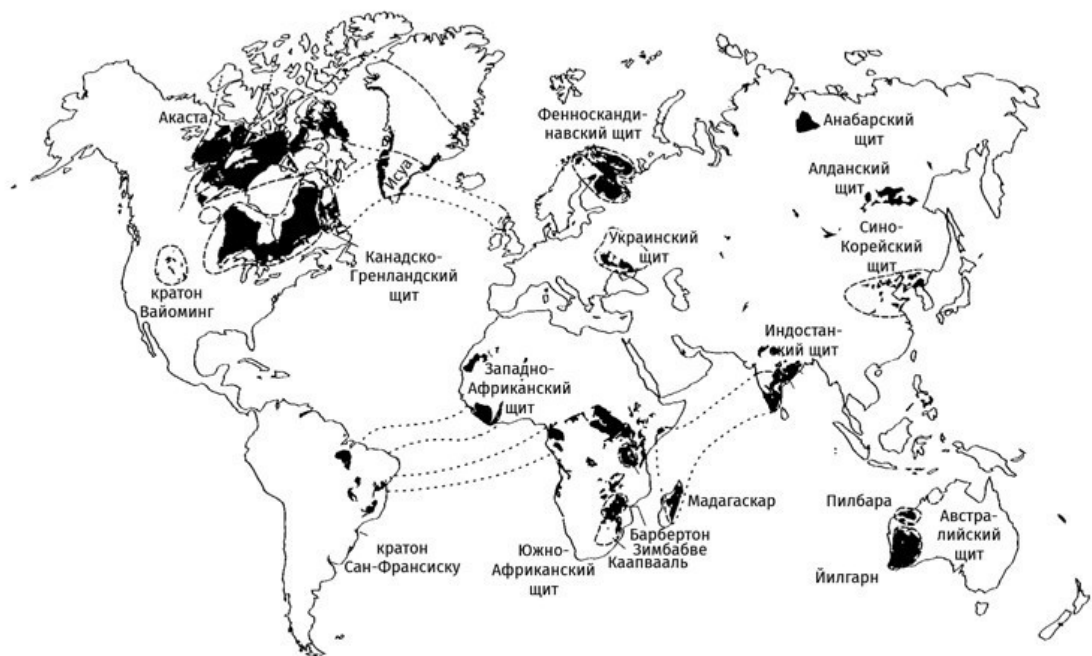


Рис. 2.2. Древние кратоны (протоконтиненты) Земли возрастом 3,5 млрд и более лет

Интересной геологической особенностью протоконтинентов являлось то, что они состояли из фрагментов океанической и континентальной коры. Иначе говоря, механизм тектоники плит уже был запущен. Не вдаваясь в подробности глубинного движителя этого механизма (процессы в мантии и ядре Земли), следует отметить, что необходимым условием его запуска является дифференциация коры на относительно тяжелую и плотную океаническую (2900 кг/м^3) и легкую континентальную ($2500\text{--}2700 \text{ кг/м}^3$). В геологии их также именуют «темной» и «светлой» – по цвету основных породообразующих минералов. Океаническая кора по большей части состоит из темно-зеленых и иссиня-черных минералов, богатых магнием, железом и кремнием, – пироксенов $(\text{Ca,Na,Mg,Fe}^{2+})(\text{Mg,Fe}^{3+},\text{Al})\text{Si}_2\text{O}_6$, оливинов $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$, основных плагиоклазов $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$, а континентальная – из серых, белых и красноватых кремний- и алюминийсодержащих силикатов (таких как кварц – SiO_2 , калиевый поле-

вой шпат – KAlSi_3O_8 , альбитовый плагиоклаз – $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Отсюда и другое название этих главных минеральных комплексов: мафический (аббревиатура от *лат.* *magnesium* – магний, *ferrum* – железо и суффикс *ic*) и фельзитовый (от *лат.* *ferrum* – железо, *alumen* – квасцы, *silex* – кремнь и тот же суффикс). Анализ распределения этих минералов в магматических источниках, земных слоях разного возраста и космических телах, включая астероиды, показывает, что «темная материя» здесь первична, а «светлая» – результат ее дифференциации, преобразования в недрах и на поверхности Земли.

Сами по себе ни минералы, ни состоящие из них горные породы, ни земная кора, которая из них, в свою очередь, построена, превращаться во что-то другое не будут: нужно либо отправить их обратно в недра на переплавку, либо изменить состав на поверхности. Первичная коматиит-магнезиально-базальтовая протогора, которая, вероятно, существовала 4,4 млрд лет назад, мало отличалась по составу от морских базальтов. Это и были базальты, только формировались они при более высоких температурах, чем современные, поскольку мантия в хадейском и архейском эонах была горячее. Из протогоры образовывались небольшие острова, которые хаотически перемещались конвекционными мантийными потоками и буквально таяли в них. Но если все слои земной коры были до поры до времени – до начала архейского эона – по составу, физическим и химическим свойствам почти одинаковыми, то можно ли заставить их погружаться и всплывать относительно друг друга? Тем более что главная фельзитовая порода – гранит – термодинамически несовместима с ультрамафическими мантийными минералами и не может напрямую выплавиться из последних, а слишком горячая мантия препятствует субдукции.

Оказывается, все-таки можно. В чем принципиальная разница Земли и несколько уступающего ей по размеру Марса? Не только в том, что на Голубой планете плиты движутся, а на Красной – нет, и даже не в наличии Мирового океана на первой из них и «Мировой суши» – на второй, но и в том, что на Земле открыто примерно 5000 разных минералов, а на Марсе – почти на порядок меньше. Про Луну и говорить нечего – их там около 150. Причем появление двух третей земных минералов (3000) прямо или косвенно связано с наличием на ней жизни. Жизнь – архейские бактериальные сообщества – и запустила, по сути, тектонику плит современного типа.

Во-первых, в поисках пропитания – необходимых микроэлементов и электронов – для обеспечения обмена веществ бактерии (а кроме них в архее никого пока не было) разлагали горные породы и минералы. Извлекать определенные элементы можно с помощью ферментов, которые, в отличие от химических катализаторов, способны ускорять реакции при обычных условиях, однако требуются в незначительных количествах даже при катализе большой массы вещества, и хелатных комплексов (от *греч.* *χηλή* – раздвоенный; такие молекулы структурно похожи на клешни, которые прочно удерживают ионы металлов). Свидетельства бактериальной деятельности навсегда запечатлены в древних базальтах в виде субмиллиметровых в диаметре извилистых ходов, в которых сохранились глинистые минералы – следы переработки базальта, а иногда и органическое вещество (конечно, только в виде почти кристаллических сгустков органического углерода – керогенов). Подобные следы, чтобы быть уверенными в их принадлежности микробам, ученые отыскивали и в свежем вулканическом стекле: поскольку, кроме кремнезема, в нем содержится большое количество редких в окружающей среде элементов (например, закисное железо, Fe^{2+}), как только базальтовая лава начинает остывать, первые же попавшие на ее поверхность бактериальные споры прорастают, и начинается бурное пиршество. (Каждый кубометр современного базальтового стекла – с содержанием до 17 % железа – может пропитать до $2,5 \times 10^{16}$ анаэробных железобактерий.) Во-первых, бактерии ускоряют выветривание силикатных минералов (подобных вышеназванным пироксенам, оливинам, плагиоклазам) на порядок и проникают в них гораздо глубже, чем любые активные вещества под действием физических и химических сил. По прошествии всего нескольких лет горная порода

превращается в насыщенное водой «нанорешето», разуплотняется, а такие продукты ее выветривания, как иллитовые и смектитовые глины, представляют собой субстрат-накопитель, ускоряющий в морской среде осаждение ионов калия. В дальнейшем новообразованная минеральная затравка способствует выплавке гранитного материала вместо базальтового.

Во-вторых, бактериальные сообщества принялись за создание совершенно новых горных пород и минералов – карбонатов, фосфатов, сульфидов, железных и других руд. В большинстве своем эти разности имеют меньшую плотность, чем мафические пироксены и оливины.

На протоконтинентах, подобных Акасте, разнообразие фельзитовых пород ограничивалось кварцевым диоритом, трондьемитом и гранодиоритом, образовавшимися при частичном плавлении толеитового базальта, из-за неглубокого заложения зон субдукции.

Когда же эти зоны, представляющие собой плавильный котел тектонических процессов, опустились в область более высоких давлений, то из исходного комплекса минералов стали выплавляться более легкие и плавучие граниты, а также связанные с их образованием вулканические породы (андезиты, риолиты) и гнейсы. Однако, чтобы зона субдукции ушла глубже в недра Земли, на нее нужно «надавить», скажем, положить сверху горную гряду: чем выше такая гряда, тем, благодаря явлению изостазии, сильнее продавится под ней астеносфера и дальше вниз нырнет под континентальную кору океаническая. Горы же образуются в результате столкновения участков континентальной коры, пусть это даже протоконтиненты, или последних с вулканическими арками. Далее из пород гранитного ряда и гнейсов с высоким разнообразием минералов и начинают складываться ядра континентов – древние кристаллические щиты. А гнейсы к тому же являются первыми свидетельствами, пусть и преобразованными, появления осадочных отложений (древнейшие – 3,85 млн лет, Исуа). Ни на Марсе, ни на Венере, ни на Луне граниты и гнейсы не появились: поверхность этих небесных тел застыла на стадии мафической протокоры. На Земле же вследствие воздействия биосферы на литосферу и преобразования мафических пород не только возник фельзитовый ряд, но и процесс (тектоника плит) пошел и значительно ускорился.

Названный выше зеленокаменный пояс Барбертон и кратоны Пилбара и Каапвааль и есть остатки древнейшей океанической и континентальной коры соответственно. В первых присутствуют подушечные базальтовые лавы (при застывании лавы в морской среде ее поверхность приобретает вид плотно уложенных подушек) и полосчатые железистые формации, во вторых – граниты и разнообразные мелководные осадочные породы. А самая древняя ископаемая тектоническая граница плит возрастом 2,7 млрд лет выявлена с помощью сейсмофизических методов под Канадским щитом – в провинциях Квебек и Онтарио.

Превзойти же геологические силы жизнь смогла, обретя иной источник энергии. Все тектонические процессы – движение плит, горообразование и др. – идут благодаря тепловому потоку, поступающему из недр Земли (радиоактивный распад и остаточное аккреционное тепло, выделившееся при столкновении планетезималей и протопланет). Этот поток оценивается в $8,7 \times 10^{-5}$ Вт/м², но тектоника успевает захватить не более десятой доли энергии ($\sim 1 \times 10^{-5}$ Вт/м²). Остальное рассеивается в космосе. Жизненные силы через различные формы фотосинтеза подпитываются напрямую от энергии Солнца – 340 Вт/м². Причем за время эволюции КПД организмов возрос: от анаэробного фотосинтеза, зависимого от различных соединений, как доноров электронов, живые существа перешли на кислородный его вариант. В этом случае используется неисчерпаемый океан электронов – вода. Быстрое истощение некоторых элементов (железо, азот, фосфор), необходимых для функционирования организмов, должно было бы ограничить дальнейший рост КПД, но благодаря ускорению круговорота этих элементов (за счет совершенствования трофической пирамиды и появления новых организмов – деструкторов отмершего органического вещества) и эта проблема была решена. На сегодняшний день биосфера потребляет в год $26,8 \times 10^{-5}$ Вт/м² только солнечной энергии. Это всего

0,07 % от энергии Солнца, поскольку 30 % рассеивается атмосферой и поверхностью Земли, а еще 69,93 % уходит на нагрев планеты и теряется в виде длинноволнового излучения.

И все равно организмы потребляют энергии на порядок больше, чем могут получить все континенты, горы и прочие геологические образования вместе взятые. Именно поэтому биосфера может себе позволить атмосферу, химически неравновесную с горными породами: это неравновесие и есть основа биохимического выветривания. [Названный выше уровень потребления энергии биосферой рассчитан исходя из данных по годовой фиксации углерода при фотосинтезе – 9×10^{15} моль; энергии, необходимой для связывания одного моля углерода с органической молекулой (пентоза), – 477 000 Дж; и площади планеты – $5,1 \times 10^{14}$ м², умноженной на $3,15 \times 10^7$ с в году.]

Перестройка планеты организмами стартовала в самом начале архейского эона.

Глава 3

Известковый океан

Архейский мир был совсем другим: суша составляла 4 % от общей площади планеты (ныне – 28 %); плато, поскольку континентальная кора была тоньше, возвышались не более чем на 2000 м (сейчас – 5500 м), а океаническая кора была толще, из-за чего вершины океанических хребтов отстояли от поверхности океана в среднем на 660–1200 м (теперь они запряганы в два раза глубже).

Иным был и состав океана. Поскольку основным источником главного морского аниона – Cl^- – является глубинная дегазация Земли, а поглощается этот анион в результате геохимических преобразований океанической коры, то за последние 4 млрд лет его среднее содержание не очень сильно менялось. А вот соотношение катионов, преобладающих в морской воде, не могло не измениться: пока не появились кислородная атмосфера и достаточно большая фельзитовая суша, благодаря выветриванию которой усилился сток щелочных (Na^+ , K^+) и некоторых щелочноземельных катионов (Mg^{2+}), обильным и достаточно активным в водной среде был Ca^{2+} . Важнейший источник этого катиона – гидротермальная активность, связанная с высокотемпературными преобразованиями океанической коры, – уже существовал. И архейский океан, вероятно, представлял собой не концентрированный раствор хлорида натрия, как сейчас, а раствор хлорида кальция (CaCl_2). Модель такого океана доступна (почти доступна): озеро Дон-Жуан в антарктической долине Райта, на дне которого формируется минерал антарктицит ($\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$), а в гиперсоленой (44‰) воде обитают цианобактерии и некоторые одноклеточные эукариоты.

К выводу о солевом режиме архейского океана можно прийти и другим путем: сейчас общая масса карбонатов составляет $4,4 \pm 1,0 \times 10^{20}$ кг, что приблизительно включает $1,8 \pm 0,4 \times 10^{20}$ кг кальция. Это в 70 раз больше массы данного металла в Мировом океане, и, следовательно, значительная его часть ($1,0 \times 10^{20}$ кг), пребывавшая в архейском эоне в растворе, вошла ныне в состав горных пород. Анализ флюидных включений в осадочном кремнеземе и гидроокислах железа возрастом 3,5–3,2 млрд лет (Пилбара) также выявил CaCl_2 – NaCl солевой состав архейского океана. Там же и в поясе Барбертон обнаружены архейские морские эвапориты: пласты поваренной соли – галита (NaCl), перемежающиеся с треной [$\text{Na}_2(\text{CO}_3) \times \text{Na}(\text{HCO}_3) \times 2\text{H}_2\text{O}$] и нахколитом [$\text{Na}(\text{HCO}_3)$]. Сейчас такие минералы формируются в щелочных ($\text{pH} = 8,1$) озерах, подобных Магади и Натрон в Восточно-Африканской рифтовой системе, прогреваемых до 70 °С. А вот сульфаты, такие как гипс ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), характерные для наших дней и всего фанерозойского эона, в то время не образовывались, что указывает на низкий уровень содержания SO_4^{2-} -иона.

Еще более показательны для представления о составе архейского океана карбонаты кальция. По характерным шестоватым кристаллам с квадратным сечением, организованным в «ежики» – ботриониды (рис. 3.1), известно, что весьма распространенным осадочным образованием был арагонитовый морской цемент (в кристаллической решетке арагонита наряду с кальцием присутствуют атомы стронция). Сами же ботриониды были аномальной величины – более метра в диаметре. А наслоения магнезиально-кальцитового цемента, который распознается по шевроновой структуре (тонкие призмы, наклоненные в противоположную сторону в каждом последующем слое), достигали нескольких метров мощности, простираясь на десятки километров. Ныне размерность таких структур не превышает первые сантиметры, хотя океан от трех до семи раз перенасыщен карбонатом кальция. Понятно, что подобные карбонатные

образования могли достигать аномальных размеров, поскольку на дне морей еще не появились ни животные с известковым скелетом, не обызвествленные водоросли или цианобактерии, которые развиваются намного быстрее неорганических кристаллов и, перехватывая поток ионов Ca^{2+} и HCO_3^- , не дают им расти.

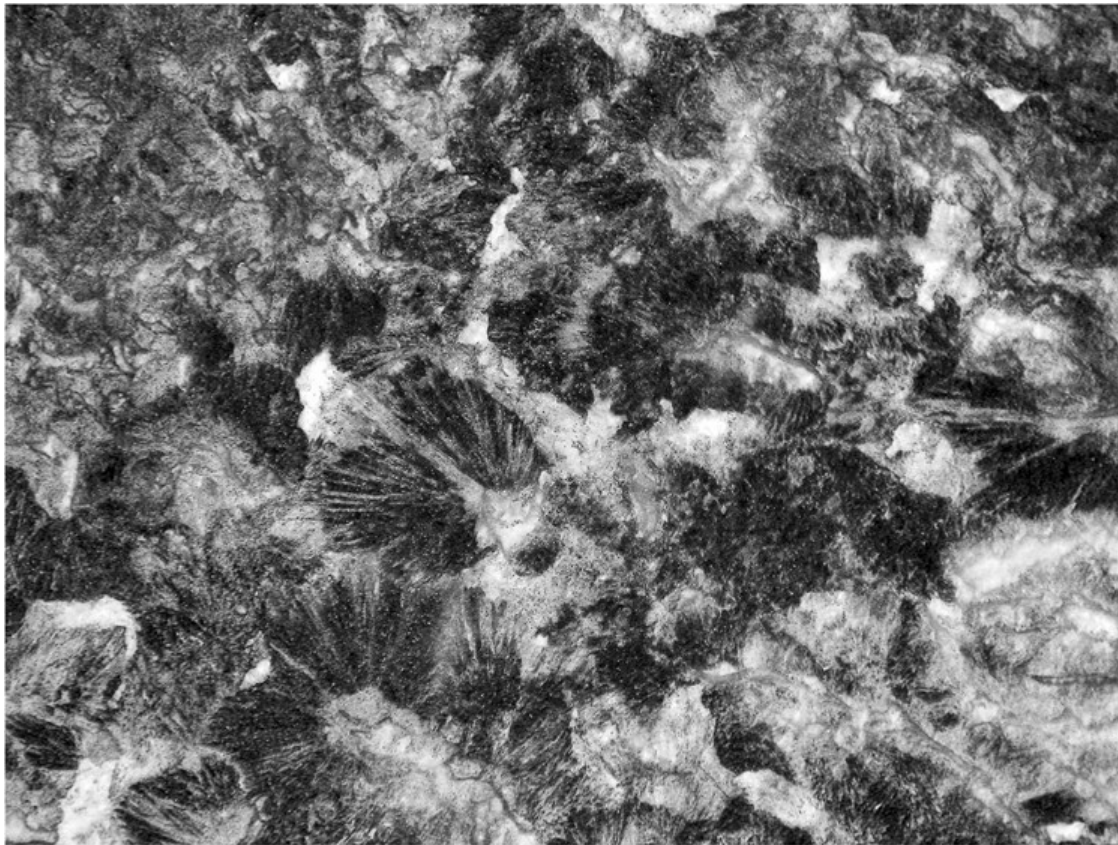


Рис. 3.1. Ботриоиды первично арагонитового морского цемента (диаметр 1 см); эдиакарий (550 млн лет); Намибия

Опираясь на расчеты и особенности озер Дон-Жуан, Магади и Натрон, можно предположить, что архейский CaCl_2 -океан был кислым ($\text{pH} = 5,5$) и позднее стал щелочным. Это очевидно не так. Моделирование континентального стока, исходя из доступного для выветривания ряда горных пород и бескислородного состава атмосферы, показывает, что в океане катионы Fe^{2+} , которые к тому же поступали из гидротермальных источников, должны были преобладать над Ca^{2+} , тем более над Mg^{2+} и Na^+ . Кроме того, с суши в больших объемах выносился бикарбонат (HCO_3^-). Бикарбонат быстро нейтрализовал ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ , что и способствовало образованию обильных карбонатов этих металлов. Так, благодаря закисному железу, которое оставалось в растворе, и карбонатно-бикарбонатному буферу океаническая среда поддерживалась ближе к нейтральной ($\text{pH} = 5,7-6,9$). Это не исключало появления отдельных кислых водоемов вблизи вулканически активных островов.

С суши и океаном в какой-то степени разобрались. А что на небе – были ли там тучи, а если были, то из каких газов состояли?

Глава 4

Что и откуда мы знаем о первичной атмосфере

Но откуда и что мы знаем об архейской атмосфере – воздушной оболочке Земли, если даже от ее самой твердой оболочки мало что осталось? Основных источников знаний – три: сами горные породы и слагающие их минералы, их изотопный состав и некоторые физические особенности этих пород. Есть, конечно, и физико-химические модели, предсказывающие определенный состав атмосферы. Однако любые модели имеют множество решений и требуют проверки, которая опять же сводится к поиску фактических – геологических, включая палеонтологические остатки, – материалов.

Таким фактическим материалом, прежде всего, служат данные о составе архейских осадочных горных пород. В прибрежно-морских отложениях этого возраста часто встречаются окатанные (т. е. испытавшие длительный перенос) обломки пирита (FeS_2), уранинита (UO_2) и сидерита (FeCO_3). Такие обломки могут накапливаться только в бескислородной среде.

Очень необычным явлением, оставившим свой след в архейских отложениях, было независимое от массы фракционирование стабильных изотопов серы ($\Delta^{33}\text{S} \approx \delta^{34}\text{S} - 0,515\delta^{34}\text{S}$) (рис. 4.1б). Это явление было обусловлено воздействием ультрафиолетового облучения среднего и длинноволнового спектра (400–280 нм) на двуокись серы (SO_2), поступающую в атмосферу вместе с другими вулканическими газами. При этом молекулы, содержавшие ^{33}S , подвергались выборочному фотолизу и фотовозбуждению (в современной атмосфере фотонный удар принимают на себя молекулы озона и кислорода). В результате значения $\Delta^{33}\text{S}$ сильно варьируют (от –2 до +12‰), что и наблюдается в архейских сульфидах (например, пирите) в виде размашистой изотопной подписи.

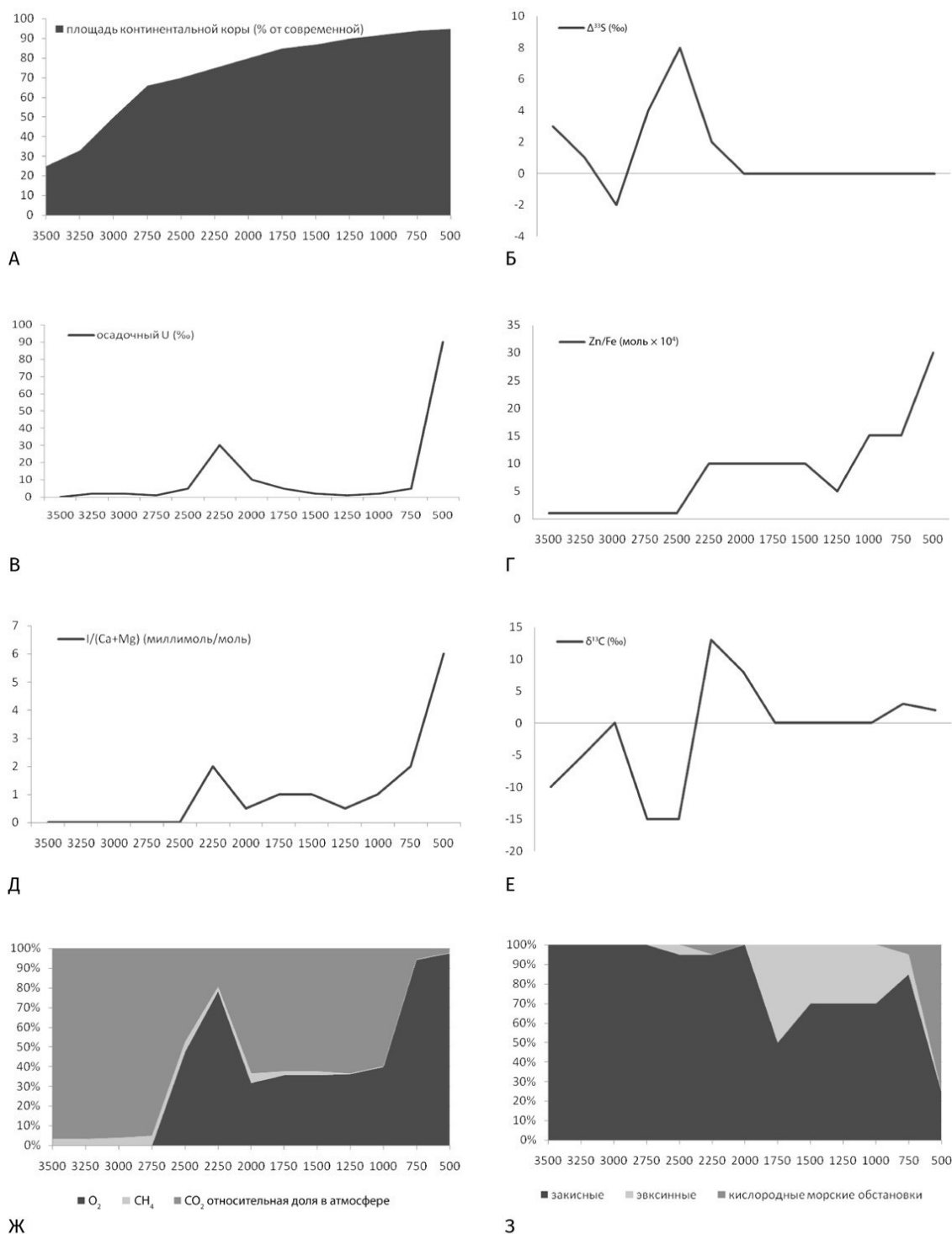
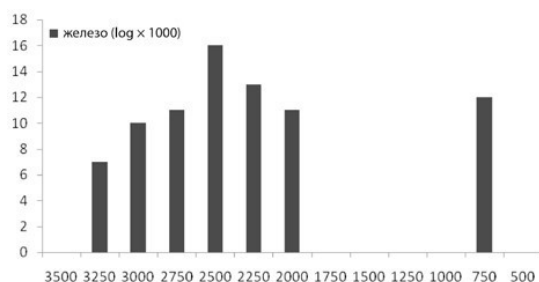
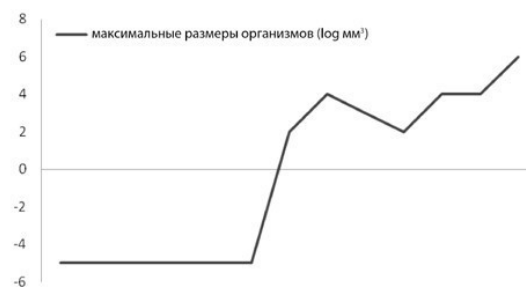


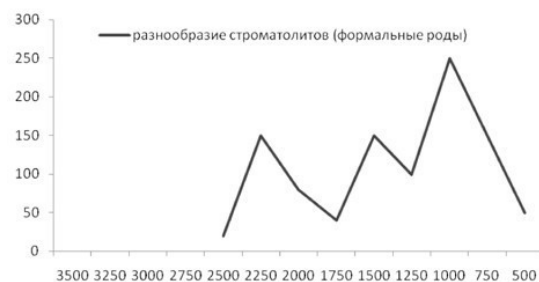
Рис. 4.1. Изменения площади континентов, основных показателей окислительно-восстановительных условий и состава океана и атмосферы, объемов накопления железных руд, а также эволюционные преобразования организмов и сообществ и значения палеотемператур в архейском и протерозойском зонах (3,5–0,5 млрд лет назад): а) рост площади континентальной коры; б) независимое от массы фракционирование изотопов серы — показатель наличия озонового слоя; в) содержание осадочного урана в углеродистых сланцах; г) молярное соотношение цинка и железа в карбонатных отло-



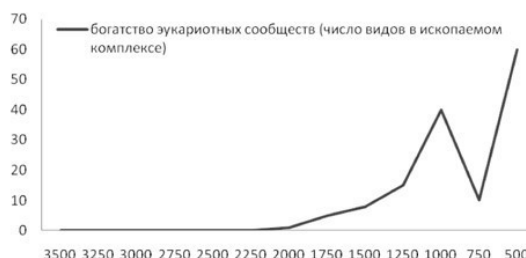
И



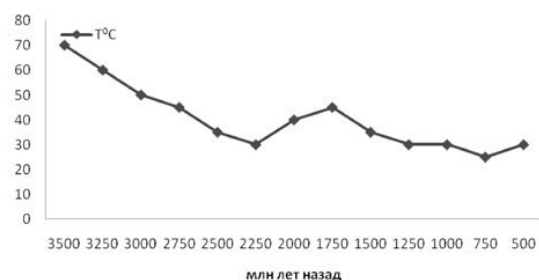
К



Л



М



Н

жениях; д) молярное соотношение йода и кальция-магния в карбонатных отложениях — показатели насыщенности океана кислородом; е) изотопная подпись углерода — показатель продуктивности биоты; ж) относительная доля в атмосфере кислорода, метана и углекислого газа; з) относительное сочетание в океане закисных, сероводородных (эвксинных) и кислородных обстановок; и) объемы железных руд; к) максимальный размер организмов; л) морфологическое разнообразие строматолитов; м) богатство эукариотных сообществ; н) палеотемпературы

А вот следы оледенений в архейской летописи полностью отсутствуют, но уже в Исуа (3,7 млрд лет) есть штормовые отложения и признаки разрушения минералов под воздействием текущей воды, например мелкие миндалины кварца, заполняющие пустоты в базальтах. Почему же Земля не превратилась в мерзлый шарик без жидкой воды и признаков жизни, если в начале архейского эона светимость Солнца была на 20–25 % слабее, чем сегодня? В середине прошлого века известные астрономы Карл Саган и Джордж Мьюллен обратили внимание и на это несоответствие теоретических ожиданий практическим наблюдениям и удачно назвали его «парадоксом слабого молодого Солнца».

Для объяснения «парадокса» за последние полстолетия были предложены десятки гипотез. И продолжают появляться новые. Последние, правда, принадлежат перу (клавиатуре)

исключительно астрофизиков и прочих специалистов, от геологии далеких. (Трудно сказать, что им мешает набрать в поисковике выражение «faint young Sun paradox» и получить пару-другую сотен статей по теме, авторами 99 % которых окажутся геофизики и геохимики.) Как любые достижения, и особенно псевдодостижения науки, которые на слуху, будоражат сознание обывателей и те клюют на нелепые сочетания слов вроде «наномойка» или «нанопарикмахерская», так и какая-нибудь модная «темная энергия» начинает привлекаться для объяснения любых явлений. И тогда «при разумном значении локальной постоянной Хаббла легко объяснить, почему Земля получала приблизительно постоянную плотность потока солнечного излучения на протяжении длительного периода в прошлом» – автор цитаты из статьи, опубликованной в научном журнале, имеет в виду поступательное удаление Земли от Солнца в поле однородного распределения «темной энергии». Или, поскольку светимость Солнца зависит от его массы и величины гравитационной постоянной, при более высоких значениях последней светимость была выше, а орбита Земли – практически круговой и меньшего радиуса, на которой планета получала больше энергии. Сама же гравитационная постоянная превратилась в «переменную» под влиянием все той же «темной энергии». Если бы Земля была «чугуниевой болванкой», могло быть что угодно, но наша планета – сложное геобиологическое явление, и подобные перестройки орбитальных параметров не могли бы не оставить на ней следов.

Например, гигантские нагромождения тайдалитов (от *англ.* tide – морской прилив и отлив). Ведь будь орбита Земли 4–3 млрд лет назад ближе к Солнцу или Луна ближе к Земле, по земной поверхности прокатывались бы мощнейшие приливно-отливные течения. Однако тайдалиты – морские слоистые отложения, состоящие из повторяющихся ритмов песчаник-алевролит-аргиллит (от наиболее грубозернистой разности, формирующейся в начале приливного цикла, до самой мелкозернистой, венчающей его; мощность отдельных слоев составляет от 0,5 до 8 см), даже архейские, ничем (почти ничем) не отличаются от современных (рис. 4.2). Небольшая разница, конечно, наблюдается – годовая ритмика несколько другая.

Так, в эдиакарских тайдалитах Южной Австралии (620 млн лет), в которых удалось проследить приливно-отливные циклы за 60 лет, синодальный ритм (от полнолуния до полнолуния или от новолуния до новолуния) длился 14,75 дня, а не 14,26, как сейчас. Чтобы вычислить циклы, составляется развертка всех слоев, где против порядкового номера каждого слоя откладывается его мощность; затем в полученной «кардиограмме» с помощью гармонического анализа находят повторы одинаковой частоты и близкой амплитуды. Синодальный цикл распознается в тайдалитах особенно отчетливо – по максимальной мощности ритма, поскольку в момент противостояния Луны, Земли и Солнца из-за эффекта сложения лунного и солнечного приливов образуется максимальная (сизигийная, от *греч.* σύζευξις – сопряжение) приливная волна. (В это время зеваки любят собираться у аббатства Ле Мон-Сен-Мишель в Нормандии и глазеть, как гранитный останец с аббатством на вершине превращается в остров, а большая автомобильная стоянка – в пролив.) На развертке заметны и менее крутые квадратные пики: Луна в это время пребывает в 1-й или 3-й четверти – ось Луна – Земля расположена под прямым углом к оси Земля – Солнце, а значит, горб лунного прилива ослабляется впадиной солнечного. Всего же выявлено 1580 сизигийно-квадратурных циклов. Изучая другие особенности этих тайдалитов – суточные циклы и «прохождение» Солнца через экватор (дни равноденствия), вызывающее самые большие сизигийные приливы, можно определить, что эдиакарские сутки длились 21,9 часа (Земля быстрее совершала оборот вокруг оси), а в году насчитывалось 400 дней (и ночей).



Рис. 4.2. Тайдалит в песчано-аргиллитовых морских отложениях; ордовик (485–470 млн лет); Иберийские горы, Испания

Данные по тайдалитам позволяют решить и проблему рецессии Луны, неподвластную физикам. Это явление – убегание Луны от Земли – тоже связано с приливами. Именно приливное трение, что установил немецкий философ Иммануил Кант в 1754 г. и математически обосновал физик Джордж Дарвин (сын выдающегося эволюциониста) в 1879-м, замедляет вращение Земли: поскольку период суточного вращения планеты короче времени прохождения спутника по орбите, ближний приливный горб «обгоняет» Луну, и, придерживая его, та притормаживает Землю. Сам же спутник, замедляя вращение планеты, в соответствии с законом сохранения совокупного момента вращения перемещается на все более дальнюю орбиту. Сейчас Луна удаляется со скоростью 3,81 см в год, что рассчитали с помощью лазерной локации поверхности нашего естественного спутника (угловые отражатели были установлены американскими астронавтами и советскими станциями «Луна-17» и «Луна-21», доставившими туда луноходы почти полвека назад). И если бы скорость рецессии была постоянной, то Луна не могла бы появиться в «небе» ранее 1,5 млрд лет назад и первые миллионы лет своего существования с близкого расстояния вызывала бы мощнейшие возмущения в мантии и непрерывную канонаду супервулканов. Однако и возраст спутника мало уступает земному, и следов таких процессов, как уже сказано, в осадочных толщах нет. Так, быть может, скорость света замедляется, а вовсе не Луна удаляется? (Физики из Хьюстона предлагают и такие идеи. Хьюстон, у вас проблемы?) Впрочем, исходя из длительности эдиакарских суток, можно определить, что скорость рецессии в то время составляла 2,17 см в год, а усредненное, рассчитанное по длительности приливо-отливных циклов в разные периоды значение этой переменной не превышало 1,46 см в год. Получается, что даже 4 млрд лет назад Луна находилась более чем в 320 000 км от поверхности Земли – не намного ближе, чем сегодня (в среднем 384 400 км). Очень далеко до предела Роша – 18 000 км, на котором, согласно расчетам французского астронома Эдуарда

Роша, сделанным в 1848 г., сила самогравитации спутника, подобного Луне, уравнивается приливной силой планеты, и спутник разрушится. Если же учесть, что взаимная конфигурация океанов и континентов на протяжении большей части истории планеты была иной, чем ныне, когда меридионально расположенный относительно узкий Атлантический океан создает резонансную волну (оттого и уровень приливов в нем выше, чем в Тихом), то средний показатель рецессии мог быть еще меньше.

Иными словами, взаимодействия триады Солнце – Земля – Луна практически не изменились со времени появления Луны, что случилось через 60 млн лет после образования Солнечной системы. Вывать к космическим силам для решения проблем архейского избыточного тепла бессмысленно. «Значит, – как полагал один персонаж Даниила Хармса, – жизнь победила смерть неизвестным для меня способом». На самом деле способ известен и сейчас на слуху: парниковый эффект – нагревание молекул некоторых газов во внутренних слоях атмосферы под воздействием инфракрасного излучения.

Наиболее вероятными претендентами на роль древних парниковых газов являются углекислый (CO_2), метан (CH_4), аммиак (NH_3), закись азота (N_2O), карбонилсульфид (OCS), а также, косвенно, азот (N_2). (Высокое парциальное давление азота расширяет адсорбционные зоны молекул CO_2 , CH_4 и водяного пара.) NH_3 , которому отводили роль парникового газа Саган и Мьюллен, а также N_2O и OCS из перечня можно сразу вычеркивать: эти газы легко разрушаются ультрафиолетовым излучением и накопиться в атмосфере в достаточно больших количествах не могут. А вот N_2 , CO_2 и CH_4 не только устойчивы, но и выделяются в значительных объемах при дегазации мантии (подводные и наземные вулканы, метаморфизм) и в процессе жизнедеятельности различных микробов и, следовательно, могли насытить архейскую атмосферу. Чтобы создать ощутимый парниковый эффект в архейском эоне, правда, понадобилось бы не менее 3 % двуокиси углерода (почти в 100 раз больше, чем ныне). Однако при таких концентрациях этот газ сконденсировался бы в облака, отражающие солнечные лучи, и по мере остывания планеты оседал бы снежными шапками на полюсах, как на Марсе. Кроме того, при высоких концентрациях углекислого газа ($\geq 1\%$) ультрафиолетовые лучи частично поглощались бы его молекулами, а частично рассеивались, и независимое от массы фракционирование стабильных изотопов серы не происходило бы. Да и сидерита в архейских палеопочвах почти нет, а этот карбонат железа просто-таки обязан был накапливаться при высоком парциальном давлении CO_2 .

Более пригодным для разогрева мог бы быть азот, который хорошо поглощает инфракрасное излучение. И достаточно устойчив, чтобы попасть в ископаемую летопись даже как газ. Например, включения флюидов в гидротермальном кварце в более древних базальтах (3,49–3,46 млрд лет) кратона Пилбара содержат атмосферный газ, когда-то растворенный в поверхностных водах. Аммиак в них отсутствует, а инертный аргон и азот определяются. Соотношение молекул разных газов во включениях зависит от парциального давления каждого из них: при современном парциальном давлении N_2 ($7,9 \times 10^4$ Па) и ^{36}Ar (3,2 Па) их соотношение колеблется в пределах $1,02\text{--}1,31 \times 10^4$ при температуре воды от 2°C (средняя для глубоких вод) до 70°C (архейский предел) и солености 0–16‰. Для архейского времени ее можно проверить по тем же включениям, и соотношение $\text{N}_2/^{36}\text{Ar}$ не выходит за пределы $1,0 \times 10^4$. Следовательно, парциальное давление азота не превышало $5,0 \times 10^4$ Па, и с ролью основного теплоизолятора он справиться не мог.

Остается метан. Тем более что метан, как парниковый газ, в 21–25 раз эффективнее двуокиси углерода, поскольку поступление в атмосферу 1×10^9 кг метана равнозначно $21\text{--}25 \times 10^9$ кг углекислого газа (данные Рабочей группы I при Межправительственной панели по изменению климата за 2007 г.). Усиленный парниковый эффект метана обусловлен тем, что его моле-

кулы поглощают более широкий спектр лучей, чем молекулы двуокиси углерода. Установить, какой из этих газов преобладал в архейской атмосфере, можно по ее плотности. Казалось бы, вообще неразрешимая задача...

Способ определения плотности древней атмосферы предложил еще в середине XIX в. англичанин Чарлз Лайель, один из основоположников современной геологии и наставник Чарлза Дарвина: нужно измерить диаметр ископаемых отпечатков дождевых капель. Такие отпечатки хорошо сохраняются в вязких и быстро твердеющих вулканических туфах при условии, что прошедший дождь был недолгим и несильным. В противном случае следы капель либо размоются, либо перекроют друг друга. Взяв за образец отпечатки дождевых капель на современных туфах – тех, что образовались в 2010 г. после извержения вулкана Эйяфьядлайёкюдль, и сравнив их с туфами из супергруппы Вентерсдорп в Каапваале, возраст которых 2,7 млрд лет, установили: самые крупные древние капли в момент удара о землю были в среднем мельче современных. Поскольку размер капель зависит от плотности атмосферы, значит, атмосфера была в 1,5–2 раза менее плотной, чем ныне.

Конечно, при этом требуется статистическая обработка огромного количества замеров, сделанных с помощью лазерного сканирования отпечатков капель, как и при другом методе определения плотности древней атмосферы, тоже связанном с вулканиками. Поскольку свежая базальтовая лава содержит огромные объемы газов, часть из них навсегда остается в виде пузырьков, заключенных в породе, такой как континентальные базальты Бунгал на кратоне Пилбара (2,74 млрд лет). Пузырьки же скапливаются на поверхности и подошве лавового языка, там, где вязкая лава, соприкасаясь с воздухом или холодными скалами, остывает быстрее. Размер навечно запечатанных в породе пузырьков на поверхности лавового языка прямо зависит от атмосферного давления, к которому прибавляется вес лавового пласта при расчетах величины лунок на его подошве. Зная мощность пласта и плотность базальтовой лавы (2650 кг/м³) и измерив самые крупные лунки на его поверхности и наименьшие на подошве, можно вычислить плотность атмосферы. Чем ниже плотность атмосферы, тем меньше разница в размере пузырьков внизу и наверху. Древние полости, конечно, позднее заполнились вторичным аморфным кремнеземом (его мы видим сейчас как вкрапления красивых агатов и сердоликов), кальцитом или хлоритом, превратившись в каменные миндалины. Расчеты, сделанные по соотношению средних величин таких миндалинов, снова показывают, что архейская атмосфера была в два раза менее плотной. И скорее всего, не могла состоять из углекислого газа или азота, но могла быть насыщена метаном.

Этот газ, несомненно, поставляли вулканы: более низкое соотношение таких элементов, как ванадий и скандий ($V/Sc = 5,2$) в архейских океанических базальтах, чем в протерозойских и современных ($V/Sc = 6,8–7,0$), указывает, что расплав формировался в глубинных восстановительных условиях и, следовательно, их излияние сопровождалось выделением метана, сероводорода и водорода. Однако основным источником метана, вероятно, была жизнедеятельность метанобразующих архей, оставивших заметные следы в изотопной летописи планеты: резко отрицательные значения $\delta^{13}C$ (–40–60‰), характерные для архейских керогенов, накопившихся в морских и озерных условиях и в палеопочвах (рис. 4.1е, ж), указывают на двухступенчатое фракционирование стабильных изотопов углерода: сначала археями, а затем метанооксиляющими бактериями (например, гамма-протеобактериями). Никакие другие группы организмов, хотя более легкий изотоп выбирают все, не способны производить отбор столь тщательно. (Археи, как и бактерии, относятся к прокариотам – одноклеточным либо колониальным существам, в клетках которых нет органелл, а наследственное вещество рассредоточено в цитоплазме.)

Остатки самих метанобразующих архей и метанооксиляющих бактерий обнаружены в кремнистых сланцах возрастом 3,47 млрд лет на кратоне Пилбара. Сами микроскопические остатки, напоминающие нитчатые колониальные бактерии, были найдены четверть века назад,

но их органическая природа оспаривалась. Лишь в наши дни благодаря точечному анализу изотопного состава углерода в органическом веществе удалось доказать, что некоторые микрофоссилии принадлежат метанобразующим археям (их изотопная подпись варьирует от -33‰ до -38‰), а другие – метанооксиляющим бактериям ($\delta^{13}\text{C} = -39\text{‰}$). Углерод археи могли извлекать из ацетатов – солей уксусной кислоты (CH_3COOH), которые формировались при выветривании древних континентов, либо из углекислого газа. А необходимый им для синтеза метана водород (донор электрона) выделялся при воздействии морской воды на свежую океаническую кору, где водород теряли богатые железом коматииты и базальты в результате деятельности железооксиляющих анаэробных бактерий.

Изотопная подпись углерода показывает отклонение ($\delta^{13}\text{C}$) в соотношении стабильных изотопов этого элемента ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) в исследуемом образце от такового в стандарте, выраженное в количестве частиц на тысячу – промилле (‰). Этот показатель рассчитывается по формуле:

$$\delta^{13}\text{C} = [(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{образец}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стандарт}} / (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{стандарт}}] \times 10^3.$$

По той же формуле определяются отклонения изотопной подписи (δ) других элементов, о которых речь пойдет ниже ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^7\text{Li}/^6\text{Li}$). Разными для каждой пары являются только стандартные образцы.

В отличие от радиоактивного изотопа (^{14}C) доля стабильных изотопов углерода в современном мире постоянна ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 98,89/1,11$). Поэтому любые отклонения от стандартной пропорции определимы и значимы, а в случае углерода практически всегда опосредованы деятельностью живых существ.

Метанобразующие археи вполне могли поддержать концентрацию метана в атмосфере, достаточную для создания парникового эффекта, – на уровне 0,1 % (ныне $< 0,0002\%$) или его смесь с CO_2 . Поскольку в отсутствие главного окислителя – кислорода – продолжительность существования молекул метана могла быть на три порядка больше, чем нынешний 10-летний срок, по достижении соотношения CH_4/CO_2 , близкого к 1, молекулы метана полимеризовались до этана (C_2H_6). И легкая дымка превратилась в туман, в котором содержание метана могло в 600 раз превышать современный уровень. (Похожая по составу атмосфера с метановыми облаками и дождями существует на Титане, спутнике Сатурна.) При определенной размерности частиц и наличии в нем паров воды туман мог оставаться проницаемым и не препятствовал нагреву поверхности Земли. Под защитой метано-этанового тумана могла повыситься и концентрация NH_3 , OCS и серных соединений, включая аэрозоли полиатомной серы (S_8).

Глава 5

Архей и археи

Сиренево-оранжевый туман не просто уберег Землю от переохлаждения, но, возможно, сделал планету даже более жаркой, чем ныне. Соотношение стабильных изотопов кислорода ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) и кремния ($^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$) в архейском (3,5–2,5 млрд лет) осадочном кремнеземе, удержавшем первичный изотопный сигнал, указывает на температуру океанических вод в пределах 50–60 °С. Близкое соотношение этих изотопов выявлено и в естественных пробах архейской воды – капельках, заключенных в кристаллах галита (каменной соли), а также в керогенах (только для $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). Если повышенные значения изотопных подписей кислорода и кремния в кремнеземе еще можно объяснить осаждением этого минерала вблизи гидротерм или в теплых изолированных водоемах, то кероген формировался в нормально-морских условиях.

Да и первично осадочный кремнезем можно отличить от других его разновидностей по определенным минералогическим и геохимическим критериям. В архейском океане молекулы ортокремневой кислоты (H_4SiO_4) полимеризовались в водной толще, образуя коллоидные наносферы, которые в условиях высокой солености слипались друг с другом и оседали на дно, где некоторое время продолжали расти. Поэтому слои кремнезема нацело сложены сферическими гранулами ($\leq 0,2$ мм). (Протерозойский кремнезем, образование которого связано с полосчатыми железными формациями, имеет иную структуру, а все фанерозойские кремневые отложения состоят из скелетов разных организмов.)

Редкость волновых знаков (ряби) на поверхности относительно глубоководных турбидитов – отложений морских мутьевых потоков (от *англ.* turbid – взвешенный, мутный) возрастом 2,7 млрд лет – предполагает низкую вязкость морской воды, также обусловленную повышенной температурой. Особенности архейских эвапоритов уже отмечались.

Если же обратиться к молекулярным корням древа жизни, то самыми древними организмами оказываются термофильные археи – прокариоты, обитающие в горячих источниках, обычно с повышенной кислотностью. (Кстати, «архей» и «археи» – слова однокоренные, подчеркивающие древность понятий, ими определяемых.) Близкие к ним метанобразующие археи также предпочитают жить при 40–85 °С, причем с повышением температуры объемы произведенного ими метана растут. Более того, реконструированные предковые белки группы факторов элонгации (удлинения), отвечающие за последовательное присоединение аминокислот к синтезируемому на органелле-рибосоме белку (иначе говоря, за удлинение белковой молекулы), являются устойчивыми к высоким температурам (45–80 °С и даже выше 80 °С). Поскольку и бактерии, и археи не обходятся без таких компонентов, то, скорее всего, унаследовали их от общего раннеархейского предка, и этот предок имел термостойкий белок-удлинитель.

Так что жизнь не только могла зародиться в «теплом прудике», как предполагал Чарлз Дарвин в письме к своему другу, английскому ботанику Джозефу Гукеру, но и долгое время существовать в тепличной обстановке. В теплой среде и темпы эволюции, вероятно, были выше. Поэтому уже в архейском эоне существовали всевозможные группы бактерий и архей, освоивших разные обстановки и образовавшие сложные сообщества. Обычно мы их не видим, а если видим, то отличить одни округлые микроскопические тельца от других (большинство прокариот имеет именно такую, коккоидную, форму) даже на современном материале без специальных анализов невозможно, но их присутствие чувствуется. В первую очередь благодаря изотопной подписи, оставленной фототрофами, буквально – «питающимися светом» (от *греч.* φως – свет и τροφή – пища).

Фототрофы фракционируют стабильные изотопы углерода – отбирают изотоп с меньшей массой и более высокой колебательной энергией (реакция с ним требует меньших энергетических затрат). Поэтому в ходе фотосинтеза органическое вещество обогащается легким изотопом (^{12}C), а среда – обедняется, что и фиксируется в конечном счете в осадочных горных породах в виде изотопной подписи.

Необычная изотопная углеродная подпись вроде бы уже стоит на отложениях возрастом 3,8 млрд лет на западе Гренландии. Выражается она в заметной изотопной разнице между графитом, заключенным в кристаллах апатита (от -13‰ до -49‰), и углеродом в составе самого минерала ($-2,3\text{‰}$). При дальнейшем изучении этого апатита выяснилось, что графит образует не внутрикристаллические включения, а, наоборот, оторочку вокруг первичных кристаллов и, значит, сформировался позже, чем апатит. А вот насколько позже, сказать сложно. В целом, чтобы установить биогенную природу подобных и даже морфологически более сложных включений, требуется доказать: 1) осадочную природу самих отложений; 2) первичность включений, которые должны быть достаточно обильны; 3) их тесную генетическую связь с первичными минералами в породе; 4) сходство степени изменения включений с таковой первичных минералов; 5) невозможность объяснить изотопную подпись углерода абиогенными процессами; 6) приложить усилия к поиску следов других биогенных элементов – O, N, S, P и 7) молекулярных органических остатков – биомаркеров. Казалось бы, все это невозможно, но ведь получается!

Вряд ли фракционированием изотопов на заре жизни занимались кислородные фототрофы, такие как цианобактерии: в архейских водах, учитывая высокое содержание растворенного железа и кремния, не могло находиться достаточно фосфора для поддержания жизни этих микробов. А вот анаэробные фотоферротрофы в таких условиях процветать могли. Таким бактериям тоже нужна энергия света для синтеза органических соединений, но в качестве донора электрона, необходимого для протекания окислительно-восстановительных реакций, они используют закисное железо (Fe^{2+}), а не воду, поэтому побочными продуктами их деятельности является Fe^{3+} (и различные минералы железа), а не кислород. Другие хемотробы примерно тогда же получили доступ и к энергии недр, особенно на срединно-океанических хребтах, где позднее сложились необычные глубоководные сообщества черных курильщиков. Признаки их жизнедеятельности заметны по изотопной подписи другого элемента – серы ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, или $\delta^{34}\text{S}$).

Сохранилось ли что-нибудь от архейских организмов, кроме почти невидимых дырок в древних базальтах и изотопных подписей? Конечно, и немало. О метанобразующих археях и метанокисляющих бактериях из Пилбары уже говорилось. Там же, в Пилбаре (формация Стрелли-Пул) и в поясе Барбертон (соответственно, 3,43 и 3,2 млрд лет), найдены коккоидные тельца с органической оболочкой, состоящей из разных углеводородных молекул и азота, и связанные с ними кристаллы пирита, сохранившие изотопную подпись серы, характерную для серных бактерий.

На первый взгляд, учитывая обилие сульфидов – минералов серы, осаждение которых редко обходится без участия серных бактерий, – в этом нет ничего удивительного, но особая изотопная подпись видна не всегда, а остатки тех, кто «расписался», практически не сохраняются. Предполагается, что серные бактерии, подобные пурпурным и зеленым, были главными архейскими фототрофами и продуцентами (от *лат.* *pro-duco* – производить, создавать) органического вещества. Используя сероводород и сульфиды, они освобождали необходимые для фотосинтеза электроны и окисляли исходные молекулы до серы (S^0) и в незначительной степени до сульфата (SO_4^{2-}). Последние взаимодействовали с катионами железа и никеля, недостатка которых в архейской зоне не было, с образованием соответствующих сульфидов

(например, пирита). Причем объемы серных соединений уравнивали объемы органического вещества.

Особенно интересно, что часть бактериального сообщества Стрелли-Пул населяла приливно-отливную зону несмотря на смертельный уровень ультрафиолета: микробы закрепились когда-то под кварцевыми зернами, которые лежали на литорали, среди черного пиритового песка. Они выживали под прозрачным кварцем, подобно тому как в пустыне Намиб сейчас выживают почвенные колониальные цианобактерии носток (*Nostoc flagelliforme*). Кварц – это и экран, предохраняющий от коротковолнового излучения, и прозрачное окно, пропускающее достаточно света для фотосинтеза, и аккумулятор влаги: вода конденсируется на нижней поверхности камешка из-за суточного перепада температур. Более того, возвращаясь к архейским бактериям, в приливно-отливной зоне благодаря естественной, пусть и слабой аэрации воды им был доступен кислород, полностью отсутствовавший даже на небольшой глубине. (Пока не появился озоновый щит, кислород в небольших количествах образовывался за счет фотолиза воды.) Вероятно, в такой обстановке могли возникнуть и более сложные организмы. Во всяком случае, в той же формации Стрелли-Пул, в ее морских мелководных отложениях выявлены цепочковидные колонии из чечевицеобразных клеток (20–100 мкм в диаметре) с оторочкой и мелкими сферическими тельцами внутри. Эти «чечевичины» не похожи на каких-либо современных прокариот, но не имеют сложно устроенной оболочки, которая выдавала бы в них эукариот (организмов с клеточными органеллами, включая ядро – от *греч.* *εὺ* – совершенно и *κάρυον* – орех, ядро).

Хотя самые древние микроскопические ископаемые остатки на сегодня выявлены в формации Стрелли-Пул, следы архейской и протерозойской бактериальной жизнедеятельности видны во всем. Даже перекатывавшиеся по морскому дну песчинки обрастали бактериальными пленками, продолжавшими осаждение карбоната, и превращались в причудливые слоистые шарики – ооиды, иногда достигавшие в диаметре нескольких сантиметров (рис. 5.1). В целом же подавляющая масса архейских и протерозойских карбонатов, значительно нарастивших площадь континентов, обязана своим происхождением бактериальным сообществам. Без них это было просто физически (и химически) невозможно: при повышенном уровне углекислого газа возрастает и кислотность среды, что усиливает растворимость карбонатов, особенно кальцита и арагонита. Воспрепятствовать растворению карбонатных минералов способны микробы, преобразуя среду из кислой в щелочную хотя бы в придонном слое.



Рис. 5.1. Известковые ооиды (диаметр 1 см); криогений (650 млн лет); горы Флиндерс, Южная Австралия

Поскольку в архейском и протерозойском мире еще не было животных, а до рубежа 850–800 млн лет – и простейших, способных питаться биоматами и пленками, они покрывали все свободное пространство, где содержалась хоть какая-то влага (рис. 5.2).

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.